

УДК 544.022:546.03:546.04

## ТОПОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ СУБМИКРОННЫХ ПЛЕНОК ЭВТЕКТИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА GaSb-CrSb

А. И. Туровец<sup>1</sup>, С. М. Барайшук<sup>1</sup>, Т. М. Ткаченко<sup>1</sup>, Р. Н. Рагимов<sup>2</sup>,  
И. Х. Мамедов<sup>3</sup>, Д. Г. Араслы<sup>2</sup>, А. А. Халилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

<sup>3</sup>Национальная академия авиации Азербайджана, Баку, Азербайджан

*Методом «мгновенного испарения» получены тонкие пленки полупроводникового эвтектического композита GaSb-CrSb. Изучены микроструктура, рельеф поверхности, подтверждена равномерность нанесения покрытий, оценена толщина наносимого покрытия методом атомно-силовой микроскопии.*

**Ключевые слова:** эвтектика, субмикронная пленка, топология поверхности, фрактальная размерность, толщина покрытия.

**Введение.** Эвтектические композиты на основе соединений III–V групп с 3d-переходными металлами, состоящие из полупроводниковой матрицы и металлических включений, представляют интерес из-за сохранения микроструктуры до температуры плавления, повторяемости и стабильности характеристик. Такие эвтектические композиты ведут себя как неоднородные и вырожденные полупроводники, а их физические свойства существенно зависят от электронной конфигурации 3d-элементов, геометрии включений и особенностей формирования межфазных зон. Из-за наличия ферромагнитных металлических включений эти композиты перспективны для создания инжекторов спин-поляризованных электронов. Ранее исследованы микроструктура и физические свойства эвтектических композитов на основе InSb и GaSb [1–3]. Приведены результаты рентгенофазового, микроструктурного анализов и атомно-силовой микроскопии поверхности полученных тонких пленок эвтектического композита GaSb-CrSb.

**Результаты и обсуждение.** Тонкие пленки эвтектического композита GaSb-CrSb получены методом «мгновенного испарения» и имели толщину в пределах 0.4÷1.0 μm.

Рентгенофазовый анализ проведен на дифрактометре «Advance 8D» с CuK<sub>α</sub>-излучением. На рис. 1 представлена дифрактограмма тонкой пленки и массивного образца эвтектики GaSb-CrSb. Как видно, массивные и тонкие пленки имеют двухфазные структуры. Интенсивность линий на дифракционном спектре указывает на кристалличность пленок.

Идентичность рентгенограмм массивного и пленочного образцов обусловлена идентичностью их состава. На это указывают и представленная микроструктура (рис. 2, а, б) тонких пленок GaSb-CrSb, выполненная сканирующим микроскопом FEI Quanta FEG, и элементный состав, определенный на спектрометре «EDS system – Oxford Inca X-act» (рис. 2 с, d).

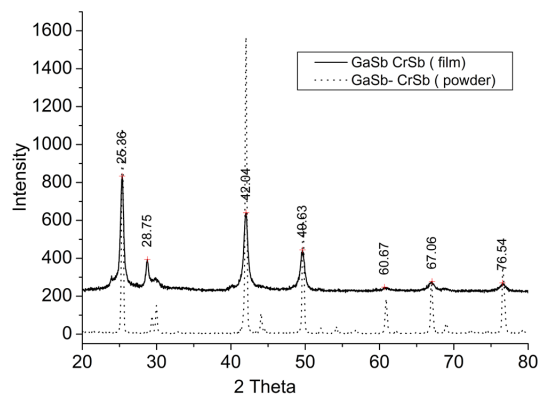
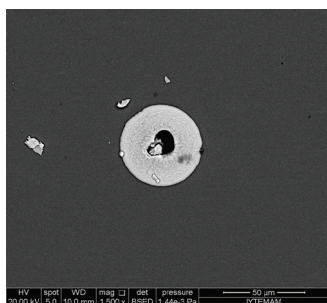
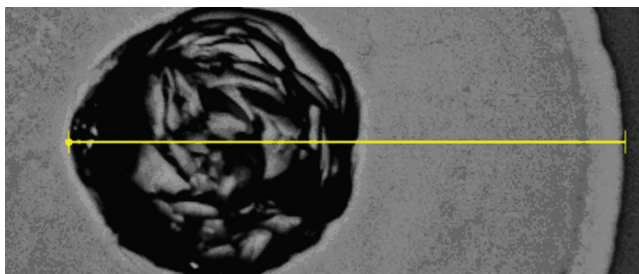


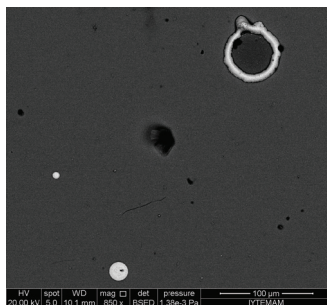
Рис. 1. Дифрактограмма тонкой пленки и массивного образца эвтектики GaSb-CrSb



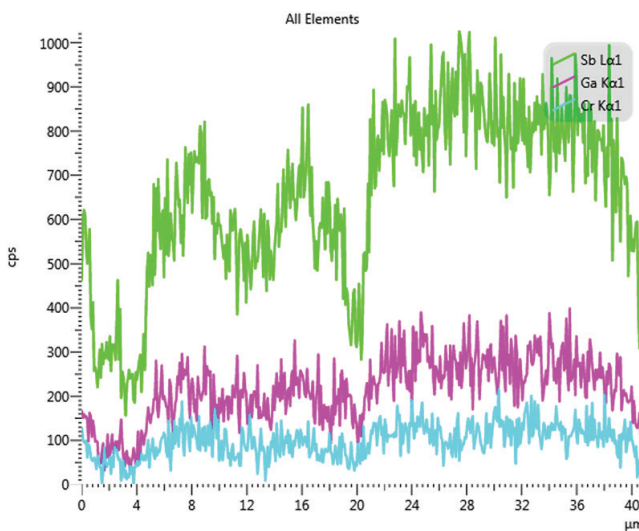
*a*



*c*



*b*



*d*

Рис. 2. Микроструктура (*a*, *b*) и элементный состав (*c*, *d*) тонкой пленки композита GaSb-CrSb

Топография поверхности исследуемых тонких пленок изучена на многофункциональном атомном силовом микроскопе NT-206 Microtestmachines Co в контактном режиме с использованием зондов Mikromasch CSC 38. Для оценки поверхности было выбрано не менее 5 площадок сканирования размером  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup> и  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup> с разных участков поверхности, что позволило провести усреднение параметров рельефа. Обработка полученных данных произведена с помощью программы «SurfaceXplorer» по методике, описанной в [4].

АСМ-исследования показали, что поверхность тонких пленок эвтектического композита GaSb-CrSb имеет развитый рельеф. На поверхности АСМ-изображений с размером площадок сканирования  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup> (рис. 3, а) наблюдаются равномерно распределенные структурные образования округлой формы, диаметр которых составляет 0,3–0,5 мкм в основании, при высоте от 50 до 100 нм, что хорошо согласуется с данными СЭМ (рис. 2). Удельная концентрация поверхностных элементов достигает 50 мкм<sup>-2</sup>.

Средняя арифметическая шероховатость поверхности, усредненная по 5 различным площадкам, при указанном выборе площадки составляет  $Ra = 5.4$  нм, среднеквадратичная  $Rq = 9.8$  нм. Отношение полной площади поверхности к площади проекции составляет 1.16.

По АСМ-данным вычислена мультифрактальная размерность поверхности методом горизонтальных сечений (площадь–периметр). При вычислении фрактальной размерности учитывалось систематическое отклонение, характерное для метода горизонтальных сечений [5, 6]. Анализ фрактальности исследованных площадок по 500 подслоям (рис. 3, б) дает среднее значение фрактальной размерности 2.78.

Дополнительно было проведено изучение морфологии поверхности при размере площадки сканирования  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>, отдельно проведен анализ областей, содержащих аномальные топографические структуры для данных поверхностей. Изображения, полученные при помощи АСМ, также хорошо согласуются с данными СЭМ. Для этих областей характерно отсутствие сколь либо значительных по размеру периодических структур, однако наблюдается

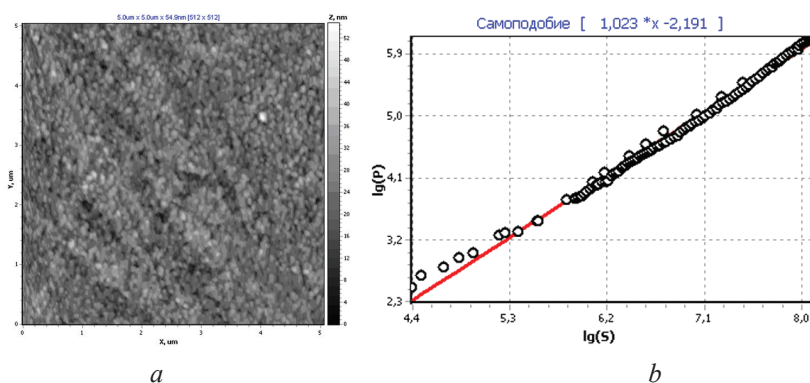


Рис. 3. Топография поверхности (а) и график соотношения периметров АСМ-изображений поверхности (б) тонких пленок композита GaSb-CrSb

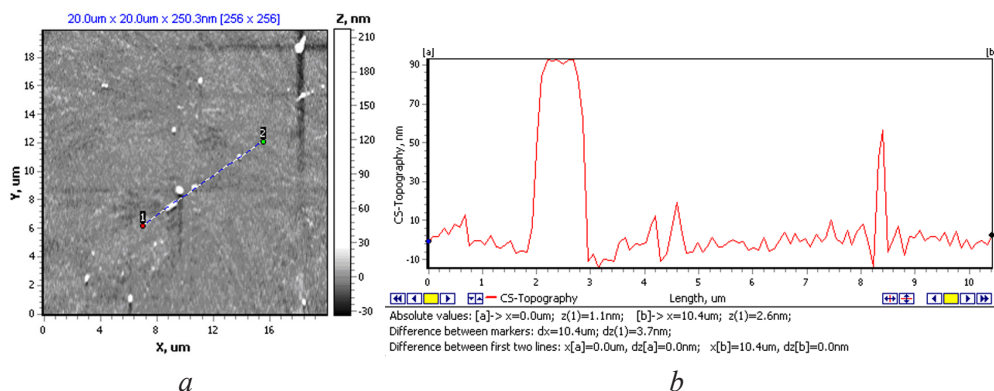


Рис. 4. Топография поверхности (а), профиль сечения вдоль линии 1–2 (b) пленки композита GaSb-CrSb

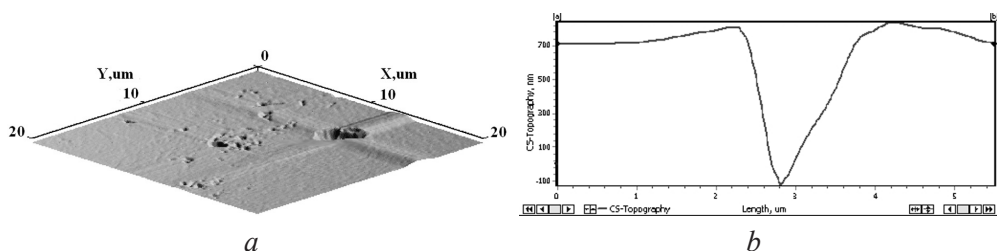


Рис. 5. Топография поверхности (а), профиль сечения вдоль основной неровности (b) пленки композита GaSb-CrSb

появление отдельных вкраплений размером от 0.3 до 1.5 мкм и высотой до 150 нм (рис. 4). Значения средней арифметической и среднеквадратичной шероховатости для данного размера площадок  $Ra = 17.3$  нм и  $Rq = 22.2$  нм соответственно. Значение фрактальной размерности исследованных площадок несколько выше в сравнении с основным рельефом и достигает 2.92, что говорит о развитой «объемной» поверхности. Это подтверждает высокое качество поверхности и достаточно хорошую равномерность нанесения покрытий.

Кроме описанных выше особенностей топографии, на поверхности как при АСМ, так и при СЭМ были замечены одиночные дефекты нанесенного покрытия, наиболее четко видные на рисунке 5. Анализ аналогичных областей методом АСМ дает возможность оценить толщину наносимого покрытия 0.8–0.9 мкм.

Возникновение данных особенностей может быть обусловлено как низкой адгезией наносимого покрытия, так и наличием на поверхности, подготовленной к нанесению покрытия, локальных дефектов, что в целом не говорит о неоднородности покрытия.

**Заключение.** Изучены микроструктура, рельеф поверхности тонких пленок полупроводникового эвтектического композита GaSb-CrSb, полученного методом «мгновенного испарения». При помощи АСМ проведена оценка толщины нанесенного покрытия 0.8–0.9 мкм. На поверхности наблюдаются равномерно

распределенные структурные образования округлой формы, диаметр которых составляет 0.3–0.5 мкм в основании при высоте от 50 до 100 нм с удельной концентрацией 50 мкм<sup>-2</sup>. Низкая средняя шероховатость поверхности позволяет говорить о высоком качестве и равномерности наносимого покрытия.

### Литература

1. Mamedov, I. Kh. Anisotropic Electrical Properties of a Eutectic InSb + MnSb Composite / I. Kh. Mamedov, D. H. Arasly, A. A. Khalilova, R. N. Rahimov // Inorganic Materials. – 2016. – Vol. 52. – № 4. – P. 423–428.
2. Rahimov, R. N. Features of Thermal and Electrical Properties of GaSb-Crsb eutectic composite / R. N. Rahimov [et. al.] // Journal Ovonic Research. – 2017. – Vol. 13. – № 3. – P. 113–118.
3. Aliyev, M. I. Features of electron and phonon processes in GaSb-FeGa / M. I. Aliyev [et. al.] // J.Phys.D: Applied Phys. – 2003. – Vol. 36. – P. 2627–2633.
4. Tashlykov, I. S. Elemental composition, topography, and wettability of the surface of graphite modified by ion-assisted deposition of chromium coatings / I. S. Tashlykov, S. M. Baraishuk // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2008. – V. 49. – № 4. – P. 303–307.
5. Almqvist, N. Fractal analysis of scanning probe microscopy images / N. Almqvist // Surface Science. – 1996. – V. 355. – P. 221–228.
6. Zahn, W. The dependence of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy / W. Zahn, A. Zösch // Fresenius J Analen Chem. – 1999. – V. 365. – P. 168–172.

УДК 669.715.018.8

А. В. Гончаров, Хосен Ри, Э. Х. Ри

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОТВЕРДОСТИ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СПЛАВА ВАЛ10, МОДИФИЦИРОВАННОГО НИКЕЛЕВОЙ ЛИГАТУРОЙ

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация*

*Представлены результаты микрорентгеноспектрального анализа элементов и измерения микро- и нанотвердости структурных составляющих не- и модифицированного никелевой лигатурой в количестве 2,5 мас.% сплава ВАЛ10. Установлено, что в исследуемых сплавах кристаллизуется два типа твердых растворов Cu, Mn и Ti в алюминии с различным содержанием меди и различной микро- и нанотвердостью.*

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, нанотвердость, лигатурный сплав, интерметаллиды.

**Введение.** Одним из эффективных способов управления структурой и свойствами алюминия и его литейных сплавов является введение малых добавок переходных металлов (ПМ), образующих алюминиды соответствующих элементов [1–3]. При этом на сегодняшний день широко исследовано влияние лигатурных сплавов, представляющих собой комплекс металлов, включающих переходные металлы третьей группы элементов периодической системы [4–5]. В этой связи одним из перспективных методов повышения свойств сплавов системы Al–Cu, к которым относится рассмотренный в данной статье сплав